REVUE DE STATISTIQUE APPLIQUÉE

J. GELAIN

1. Les apports de la statistique à la fonderie

Revue de statistique appliquée, tome 2, nº 4 (1954), p. 57-67
<http://www.numdam.org/item?id=RSA_1954__2_4_57_0>

© Société française de statistique, 1954, tous droits réservés.

L'accès aux archives de la revue « Revue de statistique appliquée » (http://www.sfds.asso.fr/publicat/rsa.htm) implique l'accord avec les conditions générales d'utilisation (http://www.numdam.org/conditions). Toute utilisation commerciale ou impression systématique est constitutive d'une infraction pénale. Toute copie ou impression de ce fichier doit contenir la présente mention de copyright.

NUMDAM
Article numérisé dans le cadre du programme
Numérisation de documents anciens mathématiques
http://www.numdam.org/

I

LES APPORTS DE LA STATISTIQUE A LA FONDERIE

par

J. GELAIN

Directeur Adjoint des Recherches
au Centre Technique des Industries de la Fonderie

1° Il me paraît utile, au début de cet exposé, et surtout pour les experts américains qui sont ici, de rappeler quelle est la structure de la Fonderie en France. Et cela, je ne crois pas pouvoir mieux le faire qu'en vous donnant la distribution statistique des fonderies d'après leur effectif, distribution qui m'a été communiquée par le Syndicat général des Fondeurs et qui a été répartie en neuf classes s'échelonnant entre 3 et 2.000 ouvriers.

Effectif	*Nombre de fonderies*
3 - 5	296
6 - 10	242
11 - 20	287
21 - 50	384
51 - 100	193
101 - 200	123
201 - 500	57
501 - 1.000	21
1.001 - 2.000	6

Vous voyez que la Fonderie française est surtout constituée de moyennes et de petites entreprises.

Puisque nous sommes réunis ici sous le signe de la Statistique, je signale que cette distribution obéit à cette loi de l'effet proportionnel ou logarithmo-normale, dont GIBRAT a montré, il y a déjà longtemps, qu'elle régissait de nombreux phénomènes économiques. En effet, si on désigne l'effectif par x, et si on trace en coordonnées galtoniennes le diagramme des fréquences relatives cumulées du nombre des fonderies en fonction de log x, on constate (fig. 1) que les points obtenus se laissent particulièrement bien compenser par une droite, dont l'équation $z = 1{,}538 \log x - 1.923$ définit le changement de variable à faire pour transformer la première distribution en distribution gaussienne. Ce sont donc les variations relatives d'effectifs qui se distribuent suivant la loi normale. Et la loi de l'effet proportionnel exprime simplement la constatation que si la conjoncture économique provoque des mouvements de personnel, les variations d'effectifs qui en résultent pour les fonderies sont proportionnelles à leurs effectifs ce qui, en somme, paraît assez naturel.

Le culcul de l'espérance mathématique de la distribution donne un chiffre voisin de 54. En sorte que l'on peut dire que l'effectif moyen des fonderies en France se situe en chiffres ronds aux environs de 50 unités.

2° Cette distribution des fonderies va vous expliquer plusieurs choses.

D'abord (et je le dis en passant, car cela n'a rien à voir avec la Statistique), elle vous explique la création, il y a quelques années, d'un organisme comme le Centre technique des Industries de la Fonderie auquel j'appartiens. En effet, ce que les fonderies prises isolément ne pouvaient pas faire (mises à part quelques grosses fonderies qui ont

d'ailleurs leurs services de recherches et leurs laboratoires propres), l'ensemble de la profession a pu le faire et celle-ci a doté généreusement son Centre technique de tous les moyens nécessaires pour lui permettre, suivant l'expression même de ses statuts, de promouvoir le progrès des techniques et de participer à l'amélioration du rendement et de la qualité.

En second lieu, cette distribution vous donne une idée du niveau du personnel de maîtrise et des cadres. La majorité de ceux-ci est constituée de praticiens issus des écoles

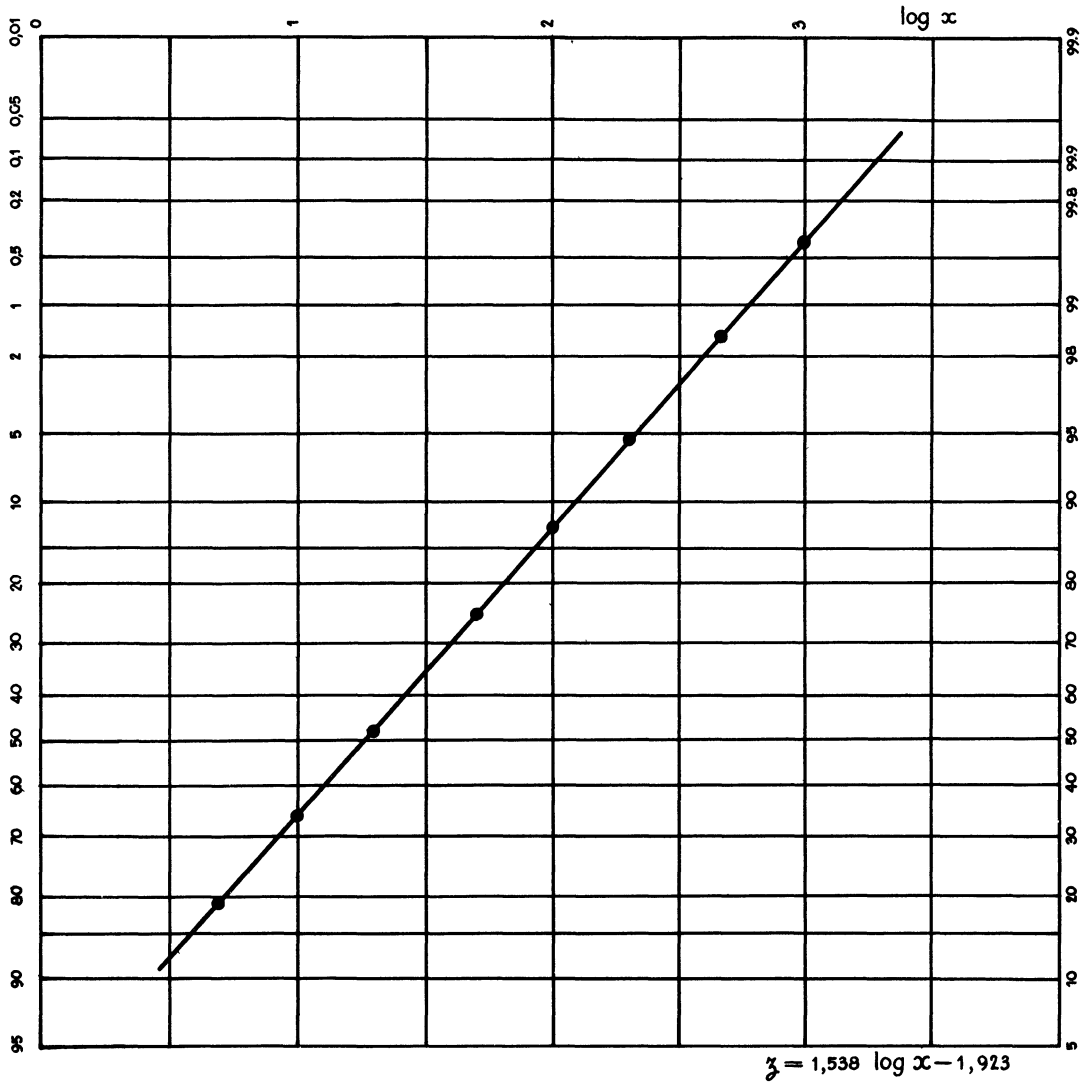

Fig. 1.-Distribution des fonderies d'après leur effectif.

professionnelles ou du rang, les ingénieurs ne se rencontrant forcément que dans les fonderies ayant déjà une certaine importance.

Enfin, et c'est là où je voulais en venir, cette distribution vous explique pourquoi les méthodes statistiques, aussi bien celles qui concernent le contrôle statistique de qualité que celles qui se rapportent à ce que l'on appelle la recherche opérationnelle, sont encore, il faut le reconnaître, très peu connues et très peu appliquées en fonderie.

Il n'y a pas de statisticien au Centre technique, et ce qui me vaut d'être ici, c'est simplement qu'ayant éprouvé au cours de mes occupations à la Direction des Recherches, la valeur des méthodes statistiques, je m'efforce de les faire connaître, car je suis

convaincu qu'elles sont les seules à pouvoir apporter des réponses satisfaisantes à un certain nombre de problèmes de fonderie, en particulier à ceux où non seulement de nombreux facteurs interviennent, mais où, de plus, ces facteurs interfèrent les uns avec les autres.

Je me propose de vous présenter quelques exemples relatifs à la recherche expérimentale, laissant à un authentique statisticien, M. MORICEAU, le soin de vous apporter quelques exemples plus consistants d'applications industrielles.

3° Il n'est pas facile dans un exposé de ce genre, d'intéresser à la fois des gens familiers avec la Stastistique et des gens qui sont étrangers à ses disciplines. Mais les statisticiens qui sont ici, et qui n'ont pas besoin d'être convaincus de la valeur de ses méthodes, ne m'en voudront pas si j'ai choisi surtout de m'adresser aux fondeurs qui sont dans cette salle. Et c'est pourquoi j'ai pris quelques exemples très simples, très modestes, mais que je crois de nature à faire entrevoir les possibilités de la Statistique.

Pour n'avoir pas à le répéter, j'indique une fois pour toutes que le seuil de probabilité adopté sera le seuil de 0,05, le plus couramment utilisé en fonderie et je rappelle que cela veut dire en langage courant qu'une conclusion ne sera considérée comme valable, comme significative, suivant l'expression consacrée, que si on peut l'exprimer avec au moins 95 chances sur 100 de ne pas se tromper.

Pour éveiller de suite l'intérêt des esprits sur les méthodes statistiques, j'ai remarqué qu'il n'y avait rien de tel que de relever dans la littérature technique quelques questions que leurs auteurs ont traitées, sans l'aide des méthodes statistiques et de montrer que cela les a conduits à des conclusions toujours insuffisantes et souvent incorrectes.

En voici quelques exemples:

1°) Il est une question toujours controversée entre fondeurs d'alliages cuivreux et qui est celle de savoir s'il vaut mieux conduire la fusion en allure réductrice ou en allure oxydante. Ces alliages sont jugés, comme la plupart des alliages, sur leurs caractéristiques mécaniques mais aussi, souvent et, en particulier pour les bronzes à l'étain destinés à la fabrication des pièces comme les robinet-vannes, par exemple, sur une propriété très importante qui est l'étanchéité. Pour cela, on coule des éprouvettes d'essais spéciales qui sont des disques présentant un bossage en leur centre (fig. 2). A l'aide d'un dispositif simple schématisé (fig. 3), on exerce une pression d'eau sur une des faces et on regarde

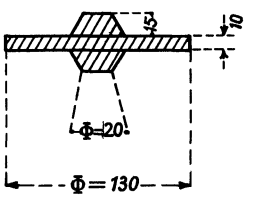

Fig. 2

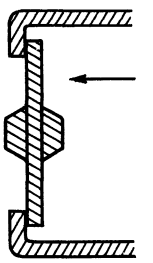

Fig. 3

si l'eau suinte sur l'autre face. Le tableau 1 indique les résultats obtenus par un expérimentateur sur 18 disques coulés en fusion réductrice (R) et sur 30 disques coulés en fusion oxydante (O), disques éprouvés à l'état brut de coulée et sous une pression de 15 kg.

Tableau I

	(R)	(O)	Total
Non poreux	11	12	23
Poreux	7	18	25
Total	18	30	48

Le raisonnement fait, raisonnement que l'on fait très souvent et presque instinctivement, était le suivant : 11 disques non poreux sur 18 cela fait 61 % en fusion réductrice. 12 disques non poreux sur 30 cela fait 40 % en fusion oxydante; donc la fusion réductrice est supérieure à la fusion oxydante. Cette conclusion n'est pas correcte.

Et voici brièvement la solution de la statistique : on détermine la distribution théorique que l'on aurait si la fusion, qu'elle soit réductrice ou oxydante, n'avait aucune influence sur la proportion de poreux et de non poreux.

Sur un total de 48 disques, il y a eu 23 non poreux au total; donc les fusions réductrices qui ont porté sur 18 disques auraient donné $\frac{23}{48} \times 18 = 8{,}62$ disques non poreux. Tous les autres chiffres peuvent être déduits par différence avec les totaux des lignes et des colonnes (ce qui montre en passant que le système n'a qu'un degré de liberté). On obtient ainsi la distribution théorique portée sur le tableau II (dans laquelle il n'y a pas lieu de s'étonner de trouver des décimales puisque c'est une distribution purement théorique).

Tableau II

	(R)	(O)	Total
Non poreux	8,62	14,38	23
Poreux	9,38	15,62	25
Total	18	30	

On fait alors l'hypothèse que les deux distributions, la théorique et l'expérimentale, ne sont pas statistiquement distinctes et on teste la validité de cette hypothèse. Ceci consiste à calculer, à l'aide des chiffres des deux distributions, un paramètre χ^2 et à le comparer à une valeur χ^2_0 lue dans une table.

Suivant que χ^2 est supérieur ou inférieur à χ^2_0, l'hypothèse est à rejeter ou non. Ici on trouve $\chi^2 = 2{,}0$ à comparer à $\chi^2_0 = 3{,}84$. L'hypothèse n'est donc pas à rejeter; les résultats expérimentaux ne la contredisent pas. Les deux distributions ne sont pas significativement distinctes; les différences constatées entre elles peuvent être dues au hasard. On ne peut donc pas conclure de ces seules expériences que la fusion réductrice est supérieure à la fusion oxydante.

Pour en revenir au raisonnement en pourcentage, il revient en somme à substituer à la distribution expérimentale la distribution suivante du tableau III.

Tableau III

	(R)	(O)
Non poreux	61	40
Poreux	39	60

Mais il est incorrect de faire cette substitution, car cette distribution est totalement différente. En effet, on trouve ici $\chi^2 = 8{,}8$ bien supérieur à $\chi^2_0 = 3{,}84$ et dans ce cas on pourrait conclure à la supériorité de la fusion réductrice.

Mais avec la distribution telle qu'elle résulte des seules expériences rapportées, on ne peut pas admettre cette conclusion (qui, dans un tel calcul, est implicitement basée sur 200 disques et non sur 48).

2° Un auteur a étudié comparativement deux coquilles en fonte destinées à la coulée d'éprouvettes de traction en alliages légers. En ce qui concerne les allongements,

il donne huit résultats d'éprouvettes coulées avec la coquille I et neuf résultats d'éprouvettes coulées avec la coquille II.

I	II
9,5 %	10 %
11,3	8
7	14
10	8,5
7	17,6
11,5	9
8	7
12,7	11,5
	15,5

Il fait les moyennes, soit 9,6 pour la coquille I, 11,2 pour la coquille II et sur le seul vu de ces moyennes il conclut à la supériorité de la coquille II.

Cette conclusion n'est pas correcte.

Un test qui tient compte non seulement de la différence constatée entre les moyennes, mais encore du nombre de résultats qui ont servi à les calculer et, de plus, de la dispersion qui s'est produite entre ces résultats, permet de voir si ces moyennes sont significativement distinctes. On calcule encore un paramètre t que l'on compare aussi à une valeur t_0 lue dans une table. Ici $t = 1{,}073$. Au seuil de probabilité 0,05, $t_0 = 2{,}131$; t étant plus petit que t_0, on peut en conclure que les moyennes ne sont pas significativement distinctes et la table permet même de préciser qu'il y a une probabilité de 0,30 (30 chances sur 100) pour qu'un écart aussi élevé entre les moyennes soit atteint ou dépassé par le seul fait du hasard.

De telles conclusions incorrectes, on en trouve de temps en temps dans la littérature technique et on en relèverait peut-être davantage si les auteurs donnaient le détail de tous leurs résultats, ce qui n'est généralement pas le cas.

Mais cela explique sans doute pourquoi il existe en fonderie des questions qui sont reprises périodiquement et avec des conclusions différentes quand ce n est pas contraires. C'est que leurs auteurs n'ont pas pris soin d'indiquer la confiance à accorder à leurs conclusions, confiance qui dépend, entre autres, du nombre et de la dispersion des résultats utilisés. Il y a encore des gens qui considèrent la dispersion comme quelque chose de gênant, qu'on passe sous silence — alors que l'originalité de la Statistique est précisément de prendre acte de cette inévitable dispersion et d'en tenir compte dans les jugements que l'on porte.

4° Voici maintenant un exemple d'application des méthodes statistiques qui, bien que très simple, a servi de caution à une augmentation très nette de la productivité de notre atelier de mécanique.

Cet atelier a, entre autres, la charge de l'usinage de toutes les éprouvettes de traction éprouvées au Centre. Celles-ci sont soit des éprouvettes relatives à des recherches des ingénieurs du Centre, soit surtout des éprouvettes des fonderies qui postulent les différents labels. Or, leur nombre était devenu tel que l'atelier ne pouvait plus suffire avec les moyens dont il disposait. Ces éprouvettes sont normalisées et en particulier, pour les fontes, l éprouvette imposée par les normes et une éprouvette à têtes filetées dont l'usinage complet demande en moyenne 15 minutes, à cause du filetage des têtes qui ne peut pas se faire sur un tour à copier. Aussi, mon collègue de l'atelier de mécanique étudie une éprouvette dont les têtes sont cannelées ce qui permet de l'usiner entièrement sur un tour à copier, en sorte que le temps d'usinage est ramené en moyenne à 3 minutes. En même temps, ayant remarqué que l'éprouvette normalisée donnait lieu à un grand nombre de cassures hors de la partie cylindrique, il en profita pour modifier la forme des congés. Il s'agissait alors, d'une façon sérieuse, de comparer cette éprouvette à l'éprouvette normalisée, si on voulait en justifier l'emploi.

Pour les labels, les fonderies envoient soit des barreaux cylindriques de 22 mm de diamètre et de 400 mm de long, soit des barreaux de 32 et de 500 mm de long. Alors, à partir d'un certain jour dans chaque barreau qui provenait des fonderies, on usina deux

éprouvettes, l'une de type normalisé N, l'autre de type modifié B. Pour chaque couple d'éprouvettes, on nota d'une part les résistances, d'autre part la position de la cassure dans la partie centrale cylindrique ou hors de cette partie centrale. On s'arrêta lorsque l'on eut 220 couples d'éprouvettes.

Au point de vue de la position de la cassure, les résultats ont été les suivants:

	Type N	Type B
Cassés dans la partie centrale	124	160
Cassés hors de la partie centrale	96	60
	220	220

Pour des éprouvettes en fonte, qui ne présentent aucun allongement, on a le sentiment qu'une cassure qui se produit hors de la partie centrale cylindrique est une cassure prématurée et que le meilleur type d'éprouvette sera celui qui donnera le plus de cassures dans la partie cylindrique.

De ce point de vue, et devant les chiffres de 124 et 160 on pourrait peut-être se passer de la Statistique pour conclure que le type B est supérieur au type N.

Cependant, il n'est pas sans intérêt de préciser quelle signification il y a lieu d'accorder à ces chiffres.

Si la forme de l'éprouvette n'avait aucune influence sur la position de la cassure, il n'y aurait pas de raison pour que cette dernière se produise plutôt dans la partie centrale que hors de cette partie. Dans ce cas, la probabilité de cassure dans la partie centrale serait $p = \frac{1}{2}$ et la probabilité de cassure hors de cette partie serait $q = \frac{1}{2}$. Les probabilités de cassure dans la partie centrale se répartiraient suivant une distribution binominale de moyenne $\mu = np = \frac{220}{2} = 110$ et d'écart-type $\sqrt{npq} = \sqrt{55}$. Etant donné le nombre élevé de résultats, on peut lui substituer la distribution normale de moyenne 110 et d'écart-type $\sqrt{55}$. Dans ces conditions, pour l'éprouvette normalisée, l'écart réduit $t = \frac{124 - 110}{55} = 1{,}9$ n'est pas significatif et on ne peut même pas assurer que la forme de l'éprouvette normalisée soit pour quelque chose dans le fait qu'il y a eu 124 cassures dans la partie centrale. Au contraire pour l'éprouvette type B, l écart réduit $t = \frac{160 - 110}{55} = 6{,}7$ est hautement significatif. La probabilité d'un tel écart est très faible, de l'ordre de 10^{-9}. Par conséquent, on peut affirmer que le type B d'éprouvette a une influence certaine sur la position de la cassure, cette influence s'exerçant dans le sens de la localisation de la cassure dans la partie cylindrique.

Il s'agissait ensuite de comparer les résistances. Cette fois, il était impossible de se passer de la Statistique, car, en regardant le tableau des résultats, on constate que des éprouvettes du type N ont donné des résistances supérieures à celle des éprouvettes du type B et que bon nombre d'éprouvettes ayant cassé hors de la partie centrale ont donné des résultats supérieurs à ceux de leurs sœurs jumelles qui ont cassé dans la partie centrale. Puisque les éprouvettes peuvent être apairées, on a testé la signification de la moyenne des différences des résistances de chaque couple. On a trouvé que la moyenne de ces différences était de 1 kg 04 en faveur de l'éprouvette type B avec un écart-type pour cette moyenne de 0,123 et on a testé si cette moyenne des différences était significativement différente de zéro. Le rapport $t = \frac{1{,}04}{0{,}123} = 8{,}9$. La probabilité d'un tel écart est encore plus faible que celle qui a été trouvée plus haut. On peut donc assurer que cette moyenne est significativement différente de zéro et que dans l'ensemble les éprouvettes type B donnent des résultats supérieurs à ceux de l'éprouvette type N. Et l'on voit que ce sentiment que l'on a, qu'une cassure hors de la partie centrale est une cassure prématurée, correspond en général à la réalité.

Finalement, non seulement on pouvait substituer sans crainte l'éprouvette type B à l'éprouvette normalisée, mais encore on pouvait affirmer qu'elle lui était supérieure.

Or, dans le courant de l'année 1953, on a usiné à l'atelier de mécanique 2.830 éprouvettes en fonte. Le gain de temps par éprouvette étant de 12 minutes, cela fait une économie totale de 570 heures.

J'ai signalé au début l'intérêt des méthodes statistiques dans l'étude des problèmes de fonderie où intervenaient simultanément plusieurs facteurs. La méthode classique consiste à maintenir constants tous les facteurs, sauf celui dont on veut étudier l'influence. Mais cette méthode, qui fait ses preuves dans les expériences de laboratoire, est difficilement applicable dans la pratique industrielle. Il est en effet pratiquement impossible de maintenir constants tous les facteurs que l'on voudrait voir rester tels. D'autre part si, comme c'est souvent le cas, ces facteurs interfèrent les uns avec les autres, la méthode classique est impuissante à déceler cette interaction, alors qu'au contraire la méthode statistique peut le faire.

Voici un exemple très simple où est étudiée l'influence simultanée de deux facteurs et qui nous a permis de résoudre à peu de frais un problème qui intéresse les fonderies qui postulent les labels de qualité des fontes grises. Je vous ai dit que ces fonderies envoient périodiquement au Centre des barreaux, surtout des barreaux de 22 mm de diamètre et de 400 mm de long. Leur intérêt est évidemment que les éprouvettes tirées de ces barreaux donnent les caractéristiques les plus élevées.

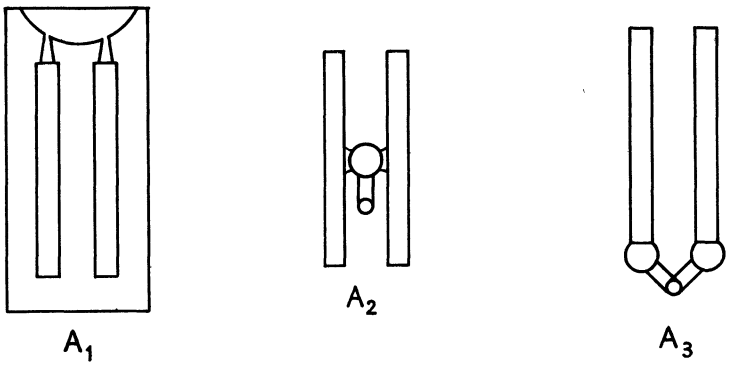

Fig. 4

Il semble que rien ne soit aussi simple que d'obtenir de tels barreaux. Oui — peut-être, si on s'en tient à l'aspect extérieur des barreaux. Mais vous allez voir qu il n'en est rien quant à la qualité du métal obtenu.

Parmi tous les facteurs qui peuvent intervenir sur la qualité de ce métal, nous en avons retenu deux, que depuis toujours les fondeurs savent être les plus importants; la température de coulée et le mode d'alimentation. L'exemple suivant est extrait d'une série d'expériences faites sur diverses qualités de fonte. Je l'ai choisi parce qu'il comporte un petit nombre de résultats, très suffisant d ailleurs en égard à la précision obtenue — ce qui a en outre l'avantage d'amenuiser la variabilité des facteurs non contrôlés et enfin de me permettre de vous les donner sans trop alourdir cet exposé.

Comme modes d'alimentation, on en a choisi trois, représentés sur la figure 4. Le premier, A_1, est le mode de coulée qui fut préconisé dans un projet de normes pour pièces en fonte. Il consiste à mouler les barreaux debout par deux et à les couler debout par deux attaques tronconiques alimentées par un même bassin de coulée.

Le deuxième, A_2, consiste à mouler les deux barreaux à plat et à les couler à plat par l'intermédiaire d'une masselotte commune borgne placée en leur milieu. Le troisième, A_3, consiste à les mouler et à les couler aussi à plat à travers une masselotte borgne individuelle placée en bout. Tous les moules sont en sable vert.

Comme température, on a choisi deux niveaux : l'un, T_1, correspondant à ce que l'on appelle couramment en fonderie, couler plutôt froid, c'est-à-dire à une tempé-

rature de l'ordre de 1.300°; l'autre, T_2, correspondant à ce que l'on appelle couler plutôt chaud, soit à une température de l'ordre de 1.400°.

A chaque température et avec chaque mode d'alimentation, on a coulé un couple de barreaux et dans chaque barreau on a usiné deux éprouvettes de traction. Le tableau IV indique les résultats obtenus.

Tableau IV

T_1 (1.310 - 1.290°)			T_2 (1.420 - 1.400°)		
A_1	A_2	A_3	A_1	A_2	A_3
27,7	29,3	31,5	32,6	34,3	35
26,5	28,9	29,2	31,1	33,2	33,8
26,3	28,3	30,7	33,6	33,0	35,0
26,8	29,3	28,5	33,6	31,0	34,3

Pratiquement, on a prélevé une poche de 50 kg de fonte dont on a repéré au couple la température Quand celle-ci a été de 1.420°, on a coulé trois moules correspondant respectivement aux alimentations A_1, A_2 et A_3. En fin de coulée, on a relevé au couple la température qui a été de 1.400°, en sorte que la température T_2 est en réalité un petit intervalle de température. On a laissé tomber la température de la fonte restant dans la poche jusqu'à ce qu'elle marque au couple 1.310° et on a coulé les trois autres moules en intervertissant les modes d'alimentation.

L'ensemble des résultats a été traité par l'analyse de la variance qui consiste, en gros :

1° A distinguer dans la somme des carrés des écarts de tous les résultats par rapport à la moyenne générale, la part qui revient à l'influence de la température, la part qui revient à l'influence du mode d'alimentation, la part qui revient éventuellement à l'interaction entre les deux facteurs alimentation-température, enfin la part de tout ce qui reste et qui correspond à l'influence incontrôlable de tous les facteurs connus ou inconnus qui ont pu intervenir et qu'on appelle l'erreur résiduelle;

2° A faire le rapport des variances des trois premières parts à la variance de l'erreur. La comparaison de ces rapports à des valeurs lues dans certaines conditions dans une table permet de dire si l'influence des facteurs étudiés est significative ou non.

Le tableau de l'analyse de la variance est ici :

Tableau V

Origine de la variation	*Somme des carrés*	*Degré de liberté*	*Variance*	F_c *calculé*	F_t *lu dans les tables*
Température T	137,31	1	137,31	138,6	$F_{t\,0,001} = 15,38$
Mode d'alimentation A	24,35	2	12,17	12,8	$F_{t\,0,001} = 10,39$
Interaction T x A ...	3,94	2	1,97	1,9	$F_{t\,0,05} = 3,55$
Erreur résiduelle ...	17,85	18	0,991		
Total	183,45	23			

L'examen des deux dernières colonnes permet de dire que les influences de la température et du mode d'alimentation sont hautement significatives. Par contre, il n'y a pas eu d'interaction significative entre la température et le mode d'alimentation.

Pour préciser ces conclusions qui sont des conclusions d'ensemble, il faut se reporter au tableau des moyennes qui est le suivant :

Tableau VI

	T_1	T_2
A_1	26,9	32,7
A_2	28,9	32,9
A_3	29,9	34,5

D'autre part, un calcul statistique simple permet de calculer à partir de la variance de l'erreur, quelle différence il doit y avoir entre les moyennes pour qu'on puisse les considérer comme significativement distinctes. On trouve ici que cette différence doit être de 1 kg 47. On est alors en mesure de préciser l'influence des facteurs :

1° Influence de la température. En comparant les colonnes, on voit qu'elle est significative pour tous les modes d'alimentation;

2° Influence du mode d'alimentation :

a) A basse température le mode A_1 est significativement inférieur aux modes A_2 et A_3 qui ne sont pas significativement distincts;

b) A haute température, le mode A_3 est toujours supérieur au mode A_1, mais il l'est aussi au mode A_2 qui se trouve n'être pas distinct du mode A_1.

Comme conclusion, on peut donc recommander aux fonderies qui coulent des barreaux de fonte mécanique résistante pour le label :

1° De couler chaud;

2° D'utiliser le mode d'alimentation A_3 : moulage à plat, coulée à plat avec attaque en bout à travers une masselotte borgne.

L'examen du tableau des moyennes et des conclusions qu'en a tirées la Statistique appelle quelques remarques.

Le mode d'alimentation A_1 qui donne les plus mauvais résultats est aussi le plus coûteux : moulage beaucoup plus long, risque de fausses serres. Il est à écarter sans regrets.

Pour le mode d'alimentation A_2, on peut s'étonner à première vue du résultat obtenu, surtout à haute température. En effet, en théorie, ce mode d'alimentation serait le plus logique. Il y a deux pôles de refroidissement symétriques par rapport à la masselotte. Les conditions d'une solidification dirigée sont parfaitement remplies. Et cependant les résultats sont moins bons qu'avec le mode A_3. C'est que pratiquement, il y a une difficulté créée par le col de la masselotte. Dans le mode A_2, celui-ci s'attache sur la partie cylindrique du barreau en son milieu (fig. 5) et on ne peut pas lui donner un trop

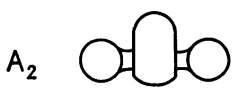

Fig. 5

Fig. 6

gros diamètre sinon on cassera le barreau en détachant la masselotte. Au contraire, pour le mode A_3 (fig. 6), l'attache du col ne présente aucune difficulté et elle se fait sur toute la section plane du barreau. Il n'est donc pas étonnant que l'alimentation se fasse moins bien avec le mode A_2 qu'avec le mode A_3, et c'est ce qui explique parfaitement les conclusions de la Statistique. C'est à dessein d'ailleurs que j'ai choisi cet exemple pour montrer que les conclusions de la Statistique qui, elles, ressortent automatiquement des chiffres qu'on lui soumet, peuvent attirer l'attention sur certaines particularités inattendues et rendre ainsi de grands services à la technique en obligeant celle-ci à en rechercher les causes.

Je ne voudrais surtout pas vous laisser l'impression que les méthodes statistiques ne s'appliquent qu'à des problèmes élémentaires comme ceux que je viens de traiter, alors que précisément c'est dans les cas complexes qu elles sont le plus efficaces. Aussi, pour terminer, je vous rapporterai une expérience dont vous allez voir l'ampleur et qui intéressera certainement les fondeurs qui sont dans cette salle.

Ils se rappellent sans doute que lorsque les hauts fourneaux mirent sur le marché, vers 1945 ou 1946, les fontes coulées en coquille à la machine, certains fondeurs crurent constater des difficultés d'usinage, en particulier de perçage, et surtout une augmentation de leurs rebuts. Il s'agissait des fonderies fabriquant des pièces minces, cuisinières, réchauds à gaz, baignoires, etc. Ces rebuts consistaient en une casse plus importante, surtout au moment de l'introduction des pièces dans les fours à émailler.

Il faut croire que les mêmes observations ont été faites ailleurs et en particulier en Italie (1), car c'est là qu'a été faite l'expérience dont je veux vous parler.

Il est certain que la structure aussi bien physique que physico-chimique des gueuses coulées à la machine est nettement différente de celle des gueuses coulées en sable et en particulier la teneur en carbone combiné des premières est beaucoup plus élevée que celle des secondes. Les Italiens ont voulu tirer au clair la question de savoir ce qu'il restait de ces différences après refusion au cubilot, dans les conditions habituelles de marche de cet appareil.

Ils ont opéré sur une coulée de 60 tonnes de fonte au haut fourneau en divisant le chenal de coulée de façon à ce que pendant le cours de la coulée et simultanément la fonte se sépare en deux parts : 30 tonnes allant au chantier sable, 30 tonnes allant à la machine. Puis ils ont refondu les deux sortes de fonte au cubilot et ont coulé (outre surtout des lingotières qui les intéressaient particulièrement) des barreaux de 15, 30, 60 mm de diamètre dans lesquels ils ont dosé le carbone combiné.

Pratiquement et afin que l'analyse statistique puisse être appliquée avec le plus de fruit, ils ont opéré sur deux coulées de 60 tonnes de haut fourneau, H_1 et H_2. De même, pour avoir des répétitions de la fusion au cubilot, chaque 30 tonnes de fonte de première fusion a été divisée en deux lots de 15 tonnes : C_1, C_2. Enfin, trois poches de fonte de 5 tonnes ont été prélevées à chaque fusion du cubilot et avec la fonte de chacune de ces poches un groupe de barreaux de chaque diamètre d_1, d_2; d_3 était coulé, dans chacun desquels le carbone combiné fut analysé. Il y avait donc trois résultats : R_1, R_2, R_3 pour chaque dimension de barreau et chaque fusion. Finalement, le schéma du dispositif factoriel était le suivant :

	SABLE								MACHINE					
	H_1						H_2		H_1		H_2			
	C_1			C_2			C_1	C_2	C_1	C_2	C_1	C_2		
	d_1	d_2	d_3	d_1	d_2	d_3						d_1	d_2	d_3
R_1	—	—	—	—	—	—						—	—	—
R_2	—	—	—	—	—	—						—	—	—
R_3	—	—	—	—	—	—						—	—	—

Les auteurs disposaient donc de $2 \times 2 \times 2 \times 3 \times 3 = 72$ résultats. Ils les ont traités par l'analyse de la variance, et voici quelle en a été la conclusion :

Quel que soit le diamètre, le carbone combiné des barreaux coulés avec la fonte provenant du chantier machine a été significativement supérieur à celui des barreaux coulés avec la fonte provenant du chantier sable.

On croyait en général jusqu'ici que ce que les fondeurs appellent l'hérédité à la trempe des fontes n'existait pas. L'expérience italienne montre que cela n'était vrai qu'en première approximation, et qu'il en reste quelque chose.

(1) *La Metallurgia Italiana*, 1952, vol. 6.

Ce quelque chose n'est d'ailleurs pas très gros. Voici quelles ont été les moyennes de toutes les analyses de carbone combiné pour les trois dimensions de barreaux :

Diamètre	*Sable*	*Machine*
60	0,67	0,77
30	0,73	0,84
15	0,85	0,93

Ces différences sur les moyennes peuvent ne pas apparaître très fortes, mais il ne faut pas oublier que ce sont des moyennes et que certains résultats ont accusé des écarts très sensibles.

L'analyse statistique a montré que ces moyennes étaient significativement distinctes au seuil de probabilité 0,01, c'est-à-dire qu'on peut l'assurer avec 99 chances sur 100 de ne pas se tromper.

Certes, il faut se garder des extrapolations. Cependant, je crois que les constatations des fondeurs relatives aux incidents que j'ai signalés, n'étaient probablement pas sans fondement. Ce fut une surprise désagréable mais passagère, car il a suffi de s'en apercevoir et de corriger en conséquence les lits de fusion.

Mais ce que je veux surtout souligner, c'est que seule l'analyse statistique, appliquée à une expérience de cette ampleur, pouvait permettre de dégager ce résultat.